



TITLE:

Study on Avalanche Breakdown in GaN(Abstract_要旨)

AUTHOR(S):

Maeda, Takuya

CITATION:

Maeda, Takuya. Study on Avalanche Breakdown in GaN. 京都大学, 2020, 博士(工学)

ISSUE DATE:

2020-03-23

URL:

<https://doi.org/10.14989/doctor.k22447>

RIGHT:

許諾条件により本文は2021-03-22に公開

京都大学	博士（工学）	氏 名	前田 拓也
論文題目	Study on Avalanche Breakdown in GaN (窒化ガリウムのアバランシェ破壊に関する研究)		
(論文内容の要旨)			
<p>本論文は、広禁制帯幅半導体である窒化ガリウム（GaN）を用いた縦型パワーデバイスの高性能化を目指して、高電界におけるGaN半導体の絶縁破壊現象に関する基礎研究をまとめたもので、6章からなる。</p> <p>第1章では、電力変換機器で用いられる半導体パワーデバイスの重要性とパワーデバイスに要求される性能を紹介した後、GaN半導体の性質とGaNパワーデバイスの有用性を述べている。特に、最近、実用化が始まったSi基板上の横型GaN系ヘテロ接合トランジスタと対比させて、GaN基板上のホモエピタキシャル成長層を用いた縦型GaNデバイス（特にショットキー障壁ダイオードと金属・酸化膜・半導体電界効果トランジスタ）の優位性と研究の現状を概説し、GaN結晶とデバイス作製に関わる研究課題を整理している。GaNパワーデバイスの性能を決定する高電界における絶縁破壊現象の理解が極めて不十分であり、電子および正孔の衝突イオン化係数が未解明であることを指摘し、当該分野における本研究の位置付けと目的を明らかにしている。</p> <p>第2章では、結晶欠陥の影響を排除できる高品質GaNホモエピタキシャル成長層を用いてpn接合を形成し、その逆方向特性について調べた結果を述べている。通常、pn接合を形成すると接合端部で顕著な電界集中が発生し、理論耐圧よりかなり低い電圧で絶縁破壊が生じる。そこで、デバイスシミュレーションを用いて様々な構造のGaN pn接合の電界強度分布を計算することにより、浅い角度を有するベベル（傾斜）メサ構造を形成し、p型およびn型領域のドーピング密度をほぼ等しくすれば、端部での電界集中をほぼ完全に抑制できることを明らかにしている。次に、実際にこのベベルメサ構造を有するpn接合ダイオードを作製することにより、電界集中がなく、温度上昇と共に耐圧が明確に増大する理想的なアバランシェ破壊特性を得ることに成功している。この結果は、GaN半導体において材料固有のアバランシェ破壊の観測に成功した初めての例であり、本論文では、その絶縁破壊特性を多角的に解析し、学術的に有用な知見を得ている。</p> <p>第3章では、ドーピング密度や基板材料を変えて作製した様々なGaN pn接合ダイオードの電気的特性を調べた結果を述べている。まず、ドーピング密度を系統的に変化させたGaNホモエピタキシャル成長層を用いてpn接合ダイオードを作製し、絶縁破壊電界のドーピング密度依存性と温度依存性を明らかにしている。なお、本研究で得られた絶縁破壊電界強度（2.8 – 3.5 MV/cm）は、GaN半導体の報告値として最高であり、当該材料の有用性を実証する結果と言える。次に、異なる転位密度を有するGaN基板を用いることにより、GaN pn接合ダイオード中に存在する転位密度を変化させてダイオード特性を調べ、貫通転位が10^6 cm^{-2}以下であれば、転位が耐圧や漏れ電流に与える影響は無視できるほど小さいことを見出している。さらに、p⁺n接合とn⁺p接合がほぼ同一の耐圧を示すことを実験的に確認し、実デバイス応用を念頭においたGaNデバイス設計を議論している。</p>			

京都大学	博士（工学）	氏 名	前田 拓也
<p>第4章では、高電界が印加されたGaN pn接合に禁制帯幅よりエネルギーの低い光を照射した際、逆バイアス条件において顕著な光電流が流れることを見出した結果について述べている。光電流の電圧依存性、照射光エネルギー依存性を系統的に測定し、逆バイアス電圧が高いほど、また光の波長が禁制帯幅で決まる基礎吸収端に近いほど光電流が増大することを実験的に明らかにしている。さらに、この光電流が、電子および正孔の波動関数が高電界によって禁制帯中に浸みだした準位間の光学遷移（フランツ・ケルディッシュ効果）に起因する電子正孔対生成によるものであることを述べ、フランツ・ケルディッシュの式を用いて実験結果を精度よく再現できることを示している。光吸収係数の電界依存性を計算し、GaNでは砒化ガリウム（GaAs）等の半導体に比べて約一桁高い電界を印加できるため、波動関数の禁制帯中への浸みだしが顕著になり、結果として強いフランツ・ケルディッシュ効果が観測されることを明らかにしている。また、GaN pn接合の光電流の温度依存性についても、禁制帯幅の温度依存性を考慮することによって定量的に説明できることを示している。</p> <p>第5章では、上記の成果を集約することにより、半導体デバイスの絶縁破壊現象を記述する上で最も重要な物性である電子および正孔の衝突イオン化係数の電界依存性をGaNで初めて決定した結果と考察を述べている。まず、GaN半導体では、p型基板が存在しないこと、基板の薄片化が困難であることのために、Si等の従来の半導体で用いられてきた手法を用いて衝突イオン化係数を決定できないことを述べている。次に、pn接合構造に工夫を加えた上で、第4章で見出したフランツ・ケルディッシュ効果を活用することにより、GaNにおいて衝突イオン化係数を決定する独自の方法を提案している。実際に、本提案に基づいてGaNダイオードの作製と光電流の測定を行い、その結果を解析することによって電子および正孔の衝突イオン化係数をGaNにおいて決定することに初めて成功している。次に、得られた衝突イオン化係数を用いて理論的な絶縁破壊電界や耐圧のドーピング密度を計算し、第3章で得られた結果と良い一致を示すことを述べている。また、本研究で得られた絶縁破壊電界のドーピング密度依存性（理論計算値）を用いてGaNパワーデバイスのオン抵抗と耐圧のトレードオフを決める性能限界を求め、他の半導体材料に対する優位性を議論している。</p> <p>第6章は結論であり、GaN pn接合の電気的特性の評価と特異性、アバランシェ破壊特性の実証、絶縁破壊特性と結晶欠陥の相関、高電界におけるフランツ・ケルディッシュ効果の発現、高電界における衝突イオン化係数の決定、およびGaN固有物性を用いたGaNデバイスの理論的性能限界の予測など、本研究を通じて得られた新しい知見を整理して述べている。また、当該分野における今後の研究課題を提示し、これらの課題解決に向けた研究指針を提案している。</p>			

(論文審査の結果の要旨)

本論文は、窒化ガリウム (GaN) パワーデバイスの高性能化を目指して、高電界における GaN 半導体の絶縁破壊現象に関する基礎研究をまとめたものであり、得られた主な成果は以下の通りである。

1. 結晶欠陥の影響を排除できる高品質 GaN を用いて pn 接合を形成し、優れた逆方向特性を得た。特に、浅い角度を有するベベルメサ構造を形成し、p 型および n 型領域のドーピング密度をほぼ等しくすることによって、デバイス端部での電界集中をほぼ完全に抑制できることを数値計算により明らかにし、実際にこの構造を有する pn 接合ダイオードを作製することで、GaN 半導体固有の絶縁破壊現象 (アバランシェ破壊) の観測に初めて成功した。
2. ドーピング密度や基板材料を変えて作製した様々な構造を有する GaN pn 接合ダイオードの電気的特性を調べ、その絶縁破壊特性を明らかにした。絶縁破壊電界のドーピング密度依存性や温度依存性を初めて決定すると共に、貫通転位が 10^6 cm^{-2} 以下であれば、転位が耐圧や漏れ電流に与える影響は無視できるほど小さいことを見出した。
3. 高電界が印加された GaN pn 接合に禁制帯幅よりエネルギーの低い光を照射した際、顕著な光電流が流れることを見出した。この光電流の電圧依存性、照射光エネルギー依存性、温度依存性を系統的に測定し、これが電子および正孔の波動関数の浸みだしに起因するフランチ・ケルディッシュ効果により説明できることを定量的に示した。GaN では砒化ガリウム (GaAs) 等の半導体に比べて約一桁高い電界を印加できるため、波動関数の禁制帯中への浸みだしが顕著になり、結果として強いフランチ・ケルディッシュ効果が観測されることを明らかにした。
4. 上記の成果を集約することにより、アバランシェ破壊現象を記述する最も重要な物性である電子および正孔の衝突イオン化係数の電界依存性を GaN で初めて決定した。次に、決定した衝突イオン化係数を用いて理論的な絶縁破壊電界のドーピング密度を計算し、第3章で得られた結果と良い一致を示すことを明らかにした。また、本研究で得られた物性を用いて GaN パワーデバイスの性能限界を求め、他の半導体材料に対する優位性を示した。

以上、要するに、本論文は高電圧電力変換用デバイスとして有望な GaN パワーデバイスの性能を支配する pn 接合の絶縁破壊特性の解明、高電界下での GaN 特有の現象の発見、さらには高電界における衝突イオン化係数の決定を達成したもので、学術上、実際上寄与するところが少なくない。よって、本論文は博士 (工学) の学位論文として価値あるものと認める。また、令和2年2月19日、論文内容とそれに関連した事項について試問を行って、申請者が博士後期課程学位取得基準を満たしていることを確認し、合格と認めた。